انجمن آهن و فولاد ایران

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



مدل‌سازی سه‌بعدی اثر خستگی در کامپوزیت‌های پلیمری فلزی یونی*

مقاله پژوهشی

آرزو خراجی[۱] نادیا نقوی[۲] حجت زامیاد[۳]

DOI: 10.22067/jmme.2023.78161.1069

چکیده *کامپوزیت‌های پلیمری فلزی-یونی (IPMC) مواد هوشمندی هستند که ساختارشان شامل دو بخش فلزی و الاستومری است. از نظر کاربردی در دسته پلیمرهای الکترواکتیو قرار می‌گیرند که گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان سنسور و عملگرهای نرم با ولتاژ تحریک اندک هستند. در کاربرد به عنوان عملگر، خمش IPMC علاوه بر ولتاژ تحریک، متأثر از عوامل ذاتی و محیطی است. پیش‌بینی «اثر پس‌آرامش» چالشی جدی در به کارگیری عملی IPMC است. اصطلاح اثر پس‌آرامش برای کاهش تدریجی خمش IPMC و بازگشت آن به طرف کاتد، تحت تحریک با ولتاژ ثابت به کار می‌رود. در این پژوهش برای اولین بار، اثر پس‌آرامش در رفتار خمشی IPMC در فضای سه‌بعدی با نرم‌افزار Comsol مدل‌سازی شده است. مقایسه نتایج با داده‌های آزمایش عملی، حاکی از دقت ۹۳ درصدی مدل‌سازی در پیش‌بینی جابه‌جایی است که سایر اطلاعات مهم عملکردی مانند تغییرات غلظت و توزیع تنش در ماده را نیز تأیید می‌کند. استفاده از این مدل برای پیش‌بینی رفتار IPMC، در مقایسه با انجام آزمایش‌های عملی، از لحاظ وقت و هزینه بسیار مقرون به صرفه خواهد بود.*

واژه‌های کلیدی مواد هوشمند، IPMC، اثر پس‌آرامش، Comsol، مدل‌سازی چندفیزیکی.

3D Modeling of Fatigue Effect in Ionic Metal Polymer Composites

Arezoo Kharaji Nadia Naghavi Hojat Zamyad

Abstract *Ionic Polymer Metal Composites (IPMC) are smart materials that consist of two parts, metal, and elastomer. Functionally, IPMCs are a group of electroactive polymers that, due to their special structure, are a suitable option for use as sensors and soft actuators with low excitation voltage. When used as an actuator, in addition to the excitation voltage, IPMC bending is affected by intrinsic and environmental factors. One of the serious challenges in the practical application of IPMC is the prediction of the "Back-Relaxation effect". The term back-relaxation effect is a term used for the gradual reduction of IPMC bending and return to the cathode side under constant voltage excitation. In this research, the effect of back-relaxation on the bending behavior of IPMC has been modeled in three dimensions with Comsol software, for the first time. The comparison of the results with the practical test data indicates high accuracy of 93% of the modeling in predicting displacement, which also confirms other important performance information such as concentration changes and stress distribution in the material. Using this model to predict IPMC behavior will be very cost-effective in terms of time and cost compared to practical tests.*

Key Words Smart Material, Ionic Polymer Metal Composite (IPMC), Back-Relaxation effect, Comsol, Multiphysics

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۵/۱۹و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۷/۹ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) دانشجوی دکتری، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

Email: Nn.Naghavi@gamil.com

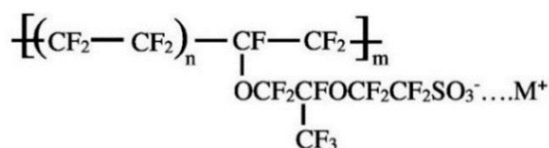
مقدمه

کامپوزیت فلزی پلیمری-یونی (Ionic Polymer Metal Composite) IPMC از یک پلیمر یونی با گروه‌های آنیونی تشکیل شده است که با کاتیون‌های متحرک محلول در آب (یا حلال دیگر) در تعادل هستند. کامپوزیت‌های پلیمری فلزی-یونی (IPMCها) گروهی از پلیمرهای الکترواکتیو هستند که به دلیل ساختار ویژه خود، گزینه مناسبی برای استفاده به‌عنوان سنسور و عملگرهای نرم با ولتاژ تحریک اندک هستند. یک نوار IPMC، از یک لایه پلیمری پوشیده شده با دو لایه رسانای فلزی تشکیل می‌شود. IPMC ماده‌ای است که حرکت مکانیکی را به سیگنال‌های الکتریکی (در حالت حسگری) و سیگنال الکتریکی را به تغییر شکل فیزیکی (در حالت عملگری) تبدیل می‌کند. رفتار ماده در غالب دو پدیده انتقال الکترومکانیکی و مکانوالکتریکی توضیح داده می‌شود. در انتقال الکترومکانیکی انرژی الکتریکی به مکانیکی و در انتقال مکانوالکتریکی انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود [1,2].

روش پیشنهادی این مطالعه بر اساس حرکات رفت و برگشتی سریع مولکول‌های آب آزاد در غشای نفیون بین آند و کاتد است. برای درک رفتار خمشی مواد IPMC ابتدا یک نوار در فضای دوبعدی مدل‌سازی شده است تا با دریافت نکات کلی و جزئی از حل معادلات فیزیکی مربوط به هر ناحیه بتوان مدل را به فضای سه‌بعدی تعمیم داد. هدف از شبیه‌سازی نوار IPMC در اصل مشاهده تغییرات غلظت به صورت تصویر متحرک در نواحی مختلف ماده و نیز تجمع بار الکتریکی است در سطح الکترودها ایجاد خواهد شد؛ زیرا قطعا در فضای دوبعدی بعد سوم که مربوط به سطوح الکترودهاست قابل مشاهده نخواهد بود.

ساختار پلیمر

پلیمرهای الکترواکتیو IPMC از یک غشای تبادل یونی پرفلورینه تشکیل شده، که از نظر شیمیایی با فلزی نجیب مانند طلا، پالادیوم، پلاتین و نقره ترکیب شده‌اند. در شکل ۱) یک ساختار شیمیایی معمول از پلیمرهای یونی (نفیون) مورد استفاده در ساخت این مواد هوشمند نشان داده شده است. در این شکل، n مقداری بین ۵ و۱۱ دارد و m تقریبا برابر ۱ (و شمارنده یون +Li ، +Na، +H و ...) است. یکی از خواص جالب این ماده توانایی آن در جذب مقادیر زیادی حلال‌های قطبی (مانند آب) است. یک پلیمر یونی پرفلورینه، Nafion معروف است که در اواخر دهه ۱۹۶۰ کشف شد و در اوایل دهه ۱۹۷۰ با فرمول شیمیایی C7HF13O5S.C3F7 به ثبت رسید [1]. نفیون اولین پلیمر از دسته پلیمرهای مصنوعی با خواص یونی است، که به آنها آینومر می‌گویند. خواص یونی منحصر به فرد نفیون نتیجه ترکیب گروه‌های پرفلوروووینیل‌اتر است که به گروه‌های سولفونات بر روی اسکلتی از ترافلوئوروواتیلن (PTFE) (Polytetrafluoroethylene) خاتمه می‌یابند. نفیون به دلیل پایداری حرارتی و مکانیکی عالی، در غشاهای تبادل پروتون توجه زیادی را به خود جلب کرده است [1-3].



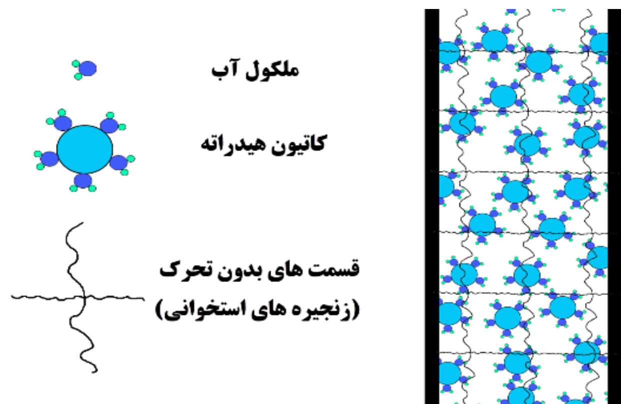
شکل ۱ ساختار مولکولی شیمیایی Nafion (برگرفته از [1])

جریان یونی در پلیمر

در حالت عملگری، کوچ کاتیون‌های هیدراته شده در ساختار پلیمر که ناشی از اعمال سیگنال الکتریکی است باعث حرکت مکانیکی IPMC می‌شود [1-4]. به عبارت بهتر IPMC شامل یک شاخه پلیمری است که به گروه‌های آنیونی و یک حلال دارای کاتیون‌های متحرک متصل‌اند. مدل ادراکی در شکل (۲) نمایش داده شده است. زمانی که ولتاژی به الکترودهای IPMC اعمال می‌شود بر اثر میدان الکتریکی ایجاد شده، شارش کاتیون‌ها (یا جریان یونی) رخ خواهد داد. در مورد IPMCهای با حلال آب کوچ کاتیون‌ها ملکول‌های آب را نیز (به علت تغییر فشار اسمزی و تورم پلیمر در نزدیکی کاتد و فشردگی آن در نزدیکی آند) همراه با خود جابه‌جا می‌کند؛ که به نوبه خود منجر به خمیدگی ماده به سمت آند می‌شود [12].

در این پژوهش، شبیه‌سازی یک نوار عملگر IPMC (Actuator) ارائه شده است. به منظور تعریف مشخصات نوار IPMC در حالت عملگری شبیه‌سازی نیروهای تغییر شکل-دهنده و خارج صفحه‌ای بر روی نوار IPMC انجام شده است. تا کنون مجموعه‌ای از معادلات اساسی (شامل معادلات شار یونی در پلیمر، الاستیسیته خطی و اثر الکتریکی الکترودها) برای

هر دو پدیده ارائه و آنالیز شده است [1,2]. میدان الکتریکی اعمالی یون‌های متحرک را درون غشای پلیمری جابه‌جا می‌کند. در نتیجه، جریان الکترواسمزی در داخل پلیمر ظاهر می‌شود و متعاقبا حرکت و تغییر شکل در عملگر اتفاق می‌افتد [2].



شکل ۲ مدل مفهومی IPMC (برگفته از [13])

علی‌رغم مزایا و ویژگی‌های امیدوارکننده کامپوزیت پلیمر–فلز یونی (IPMC)، این ماده هوشمند دارای معایبی است که باید تا حدامکان برای بهبود عملکرد آن برطرف گردند. همان‌طور که توضیح داده شد یکی از محدودیت‌های IPMC، پدیده پس‌آرامش است که در زمان بازگشت این ماده به حالت استراحت اتفاق می‌افتد. پدیده بازگشت به حالت استراحت (Back Relaxation) مشاهده شده در نوارهای با آرایش پایه IPMC که با ولتاژ DC تحریک شده‌اند، به دلیل وجود کاتیون‌های غیرهیدارته در شبکه پلیمری است. بنابراین، از آنجا که کاتیون‌های هیدراته از سمت الکترود آند به سمت الکترود کاتد در حرکت‌اند، به طور هم زمان برخی مولکول‌های آزاد آب را، به عنوان جرم اضافی، به سمت کاتد منتقل می‌کنند، و اگر ولتاژ تحریک DC باشد، به علت تعادل استاتیک انتظار می‌رود IPMC در نقطه انتهایی فعالیت خودش بماند و به عقب (یعنی حال قبل از تحریک و خمش) برنگردد، اما در واقع نوار IPMC به عقب خمیده می‌شود و در نتیجه پدیده Back Relaxation را از خود نشان می‌دهد. پیش از این برای از بین بردن این رفتار راهکارهای مختلفی ارائه شده است. از جمله چندین تکنیک مبتنی بر استفاده از یک حلقه کنترل بازخورد برای کاهش اثر پس‌آرامش پیشنهاد شده است. با این حال، این تکنیک‌ها تنها زمانی مؤثر هستند که جابه‌جایی خمشی IPMC کوچک باشد [1-6]. تا کنون در زمینه مدل‌سازی فیزیک پدیده انتقال الکترومکانیکی IPMC تلاش‌های قابل‌توجهی انجام شده است.

یک روش طبقه‌بندی مدل‌های موجود، آشنایی با نحوه توصیف فیزیک مسئله است [1]. دسته اول مدل‌های ارتباطدهنده بین جابه‌جایی و جریان که تقریبا به طور تجربی شکل گرفته‌اند، اغلب بر اساس توضیح مدار معادل الکتریکی است. دسته دوم مدل‌ها، شار یونی درون مواد را در نظر می‌گیرند [1-5]. به‌طورکلی مدل‌های حالت عملگری IPMC که تحریک الکتریکی خارجی را به تغییر شکل مکانیکی مواد مرتبط می‌سازند، می‌توان در سه گروه کلی مدل‌های جعبه‌سیاه، جعبه-خاکستری و جعبه‌سفید دسته‌بندی نمود [1]. مدل‌های جعبه‌سیاه رابطه مستقیمی بین ورودی–خروجی سیستم نمایش می‌دهند که می‌تواند با استفاده از معادلات جبری، اطلاعات و داده‌های آزمایش و بدون دانش قبلی راجع به فیزیک مسئله ایجاد شود [1]. مدل‌های جعبه‌سفید برای هر قسمت از مدل، مفهومی فراهم می‌آورد و رفتار میکروسکوپی یک سیستم را با استفاده از مدل‌های منحصر به زیرشاخه‌های فرایند اصلی شرح می‌دهد. به بیان دیگر مسئله را به مسائل ریز می‌شکند. مدل‌های جعبه‌سفید برای عملگر IPMC، انتقال الکترومکانیکی را از طریق فرایندهای مکانیکی، الکتریکی، شیمیایی شرح می‌دهد. در مقایسه با سایر مدل‌ها، دستیابی به این مدل دشوارتر است و برای کاربردهای مهندسی به‌ندرت استفاده می‌شود [1]. مدل‌های جعبه‌خاکستری بر درک فیزیک‌هایی حاکم بر رفتار سیستم استوارند و بخش‌های نامشخص را با استفاده از مدل‌های تجربی جبران می‌سازد. بنابراین این مدل‌ها ترکیبی از مدل‌های جعبه‌سیاه و جعبه‌سفید هستند. مدل‌های جعبه‌خاکستری به‌سادگی از نقطه‌نظر شناسایی سیستم یک مصالحه بین نیازهای اساسی مدل برای درک سیستم برقرار می‌کند [1]. با توجه به اینکه شبیه‌سازی رفتار IPMC نیازمند مطالعه دقیق و یافتن ارتباطی بین خواص مکانیکی و شیمیایی فلز و پلیمر در صورت اعمال میدان الکتریکی است، تمرکز این مقاله روی مدل‌های تحلیلی (از انواع مدل‌های جعبه‌سفید) [1] است. هم‌چنین چون تفاوت جنس، خواص مکانوالکتریکی و شیمیایی در الکترودها و نفیون و شرایط مرزی بین دو ماده نیازمند حل میکروسکوپی معادلات اساسی مشترک است، از میان انواع مدل‌های تحلیلی به مدل‌های فیزیکی و شبیه‌سازی رفتار IPMC با استفاده از نرم‌افزار کامسول که اساس حلگرهای (Solver) آن بر پایه روش‌های المان محدود (Finit Elemnt Methode) است، می‌پردازد [1,3]. نرم‌افزار چندفیزیکی کامسول یک مجموعه کامل شبیه‌سازی است که می‌تواند معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را توسط مشتق‌های جزئی به روش اجزای

محدود (FEM) در فضاهای یک، دو و سه‌بعدی حل نماید. این نرم‌افزار می‌تواند در حضور چالش‌هایی نظیر میدان‌های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز به خوبی راهگشا باشد. کامسول همچنین فرصت حل مسئله با فرمول‌های ریاضی (در فرم معادلات) و فیزیک (انتخاب مدل فیزیکی) را به کاربر می‌دهد. بدیهی است، در هر مسئله یک سیستم معادلات حل خواهد شد اما تفاوت فقط در نحوه استفاده از سیستم‌های فیزیکی نهفته‌است. می‌توان از معادلات از پیش تعریف شده برای اکثر پدیده‌ها در علوم و فناوری، مانند انواع روش‌های انتقال حرارت، برق، تئوری الاستیسیته، نفوذ و انتشار مولکولی، انتقال جرم، انتشار موج و جریان سیال استفاده کرد.

در ادامه بنا بر آنچه گفته شد، ابتدا در بخش روش تحقیق، مروری بر معادلات حاکم بر فیزیک IPMC و نحوه مدل‌سازی کامپوزیت در حالت سه‌بعدی را با جزئیات بررسی خواهیم کرد. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی را به صورت گرافیکی در قالب نرخ تغییرات غلظت، تنش، نیروهای بدنه، تغییرات جابه‌جایی نسبت به زمان، تحت تحریک ولتاژی بررسی کرده و از نظر کمی نتایج حاصل از مقایسه جابه‌جایی نوک IPMC را با داده‌های ثبت شده از آزمایش عملی ارزیابی می‌نماییم.

اثر الکتریکی الکترودها

مطالعات انجام شده حاکی از آن است که جریان الکترودها روی رفتار انتقال الکترومکانیکی تأثیرگذار است و الکترودها به طور قابل توجهی بر دینامیک بار و عملکرد عملگری IPMC تأثیر می‌گذارند. برای در نظر گرفتن الکترود در مدل، جریان یونی در پلیمر با جریان الکتریکی در الکترودها کوپل می‌شود. برخلاف مدل‌های فیزیکی پیشین، الکترودها ایدئال نیستند اما از هدایت الکتریکی با ضریب انتقال محدود برخوردار هستند. اگرچه اثر الکترود در مورد انتقال الکترومکانیکی (مقاوم در برابر جریان) بیشتر قابل درک است، اما فیزیک پایه برای هر دو نوع انتقال یکسان است. معادله (۱) جریان یونی را در بخش پلیمری IPMC توصیف می‌کند. در مورد الکترودها، شکل دیفرانسیلی قانون اهم برای چگالی جریان به صورت رابطه (۱) است [2]:

$$\sigma \Delta V = -j \quad (۱)$$

که در آن ϕ هدایت الکتریکی الکترودها است، V و j به ترتیب پتانسیل الکتریکی و چگالی جریان در الکترودها است [1].

عوامل مؤثر بر رفتار IPMC

به طور کلی عوامل مختلفی رفتار IPMC را در هر دو حالت سنسوری و عملگری تحت تأثیر قرار می‌دهند که می‌توان آنها را در دو دسته کلی عوامل ذاتی و محیطی قرار داد. تأثیرگذاری همین عوامل است که سبب می‌شود مدل‌های خطی انعطاف-پذیری کافی برای مدل‌سازی رفتار IPMC را نداشته باشند و رفتار ورودی و خروجی در این پلیمر تنها با استفاده از مدل‌های غیرخطی قابل مدل‌سازی و پیش‌بینی باشد. آزمایش‌های انجام شده بر روی IPMC نشان می‌دهد، میزان خمش در حالت عملگری و درک جابه‌جایی سنسوری این ماده تحت تأثیر عواملی قرار دارد که متناسب با کاربرد مورد نظر در ساخت این ماده باید در نظر گرفته شود. از این پارامترهای مؤثر که عمدتا متأثر از نحوه ساخت IPMC هستند، اصطلاحا تحت عنوان عوامل ذاتی نام یاد می‌کنیم. مهم‌ترین عوامل ذاتی عبارتند از:

۱. نوع یون‌های لایه پلیمری (غلظت بالاتر منجر به پایداری خمش می‌شود).
۲. ضخامت یون‌های لایه پلیمری (هرچه ضخامت بیشتر انعطاف و خمش بیشتر).
۳. ابعاد نوار IPMC (نسبت طول به عرض، طول بیشتر سبب خمش بیشتر می‌شود ولی برای عرض برعکس است).
۴. جنس الکترودهای پوشاننده لایه پلیمری و ضخامت آنها.
۵. فاکتور خستگی (ویژگی‌ای از ماده که باعث می‌شود جابه‌جایی به مرور کمتر شود).
۶. پسماند.

ویژگی‌ها و کاربردهای IPMC

IPMCها به دلیل سبکی، انعطاف‌پذیری، نرمی، سازگاری با محیط یونی داخل بدن و شباهت رفتاری با رفتار عضلات بدن از جمله مواد پرکاربرد و مورد مطالعه در علوم مهندسی و خصوصا مهندسی پزشکی به شمار می‌روند و تحت عنوان ماهیچه‌های مصنوعی نیز شناخته می‌شوند [1].

به علت انعطاف‌پذیری بسیار خوب و اعمال نیروی نسبتا زیاد (نیرویی نزدیک به ۴۰ برابر وزن خود) این مواد در مقابل اعمال ولتاژ بسیار کم و عکس‌العمل بسیار سریع آنها (در کسری

از ثانیه) در ساخت ماهیچه‌های مصنوعی کاربرد دارند. مطابق توضیحات ارائه شده ویژگی‌های منحصر به فرد IPMC باعث شده در کاربردهای گوناگون صنعتی و پزشکی مورد توجه باشد که به برخی از آنها اشاره شد. در این قسمت به طور خاص مهم‌ترین کاربردهای پزشکی به تفکیک مورد بررسی قرار می-گیرد [27,28].

کاربردهای پزشکی IPMC در حالت عملگر

IPMCها به دلیل انطباق زیاد، ولتاژ فعال‌سازی پایین، توانایی کار در شرایط محیطی مختلف و سهولت ساخت و سفارشی سازی، نویدبخش فعال‌سازی، سنجش و برداشت انرژی در رباتیک نرم، مهندسی زیست پزشکی، ذخیره انرژی و حتی کاربردهای فضایی هستند [27-3].

از مهم‌ترین دغدغه‌های استفاده از ابزارآلات پزشکی محرک در تشخیص و درمان بیماری‌های داخلی بدن انسان سازگاری با محیط الکترولیتی بدن، تأمین انرژی لازم و ابعاد قابل تغییر برای ایجاد حرکت دل‌خواه در عنصر محرک مورد نظر است. همین مسئله باعث شده IPMCها به دلیل تطابق با محیط الکترولیتی بدن، ولتاژ کاری کم و امکان استفاده با ابعاد مختلف یکی از بهترین گزینه‌ها به عنوان یک اکچویتر باشند.

۱. ماهیچه‌های کمک‌رسان قلبی (بطن مصنوعی)
۲. عضلات صاف و اسفنکتری مصنوعی
۳. اصلاح عیوب انکساری چشم
۴. پروتزهای مایو الکتریک دست
۵. استفاده به عنوان دریچه دستگاه تحویل هدفمند دارو به صورت بی‌سیم
۶. انگشت مصنوعی [27].

بیان مسئله اثر خستگی در IPMCها

پدیده بازگشت به حالت استراحت (Back Relaxation) مشاهده شده در تیر IPMC که با اعمال ولتاژ DC تحریک شده‌اند، به دلیل وجود ملکول‌های غیرهیدارته در شبکه پلیمری است. بنابراین، از آنجا که کاتیون‌های هیدراته از سمت الکترود آند به سمت الکترود کاتد در حرکت‌اند، به طور هم‌زمان برخی مولکول‌های آزاد آب را، به عنوان جرم اضافی، به سمت کاتد منتقل می‌کنند، و اگر ولتاژ تحریک DC باشد، به علت تعادل استاتیک انتظار می‌رود IPMC در نقطه انتهایی فعالیت خودش بماند و به عقب (یعنی حال قبل از تحریک و خمش) برنگردد، اما در واقع نوار IPMC به عقب خمیده می‌شود و در نتیجه پدیده Back Relaxation را از خود نشان می‌دهد. حال تصمیم بر آن است که ابتدا برای درک رفتار خمشی این مواد یک نوار IPMC را مشابه [2] مدل‌سازی نموده و با دریافت نکات جزئی از حل معادلات فیزیکی مربوط به هر ناحیه توانستیم مدل را به فضای سه‌بعدی تعمیم دهیم.

روش تحقیق

معادلات فیزیکی-شیمیایی

برخلاف انتقال مکانوالکتریک در انتقال الکترومکانیک، تحت تأثیر اعمال اختلاف ولتاژ به الکترودها IPMC دچار تغییر شکل و بخش آزاد تیر از انتها شروع به خمیدگی می‌کند. آنچه حائز اهمیت است این است که علت اصلی هر دو پدیده مکانوالکتریکی و الکترومکانیکی جریان یونی القاشده و در نتیجه توزیع بار غیرمتقارن در مجاورت الکترودهاست. جریان یونی در پلیمر از معادله نرنست‌پلانک طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود [1,2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla.(D\nabla C - z\mu F C\nabla\phi - \mu C\Delta V\Delta P) = 0 \qquad (۲)$$

که در آن C غلظت کاتیون، μ قابلیت تحرک (Mobility) کاتیون، D ثابت انتشار، F ثابت فارادی، Z عدد بار، ΔV حجم مولی (که معیاری برای کمیت‌سنجی آب‌دوستی کاتیون‌ها به شمار می‌رود)، P. فشار حلال وϕ پتانسیل الکتریکی در پلیمر است. لازم به ذکر است که پتانسیل الکتریکی ϕ در داخل پلیمر و پتانسیل الکتریکی V در الکترودها دو متغیر متفاوتند. ضریب پویایی μ را می‌توان به‌صورت رابطه (۳) بیان کرد [1,2]:

$$\mu = \frac{D}{RT} \qquad (۳)$$

در این رابطه R ثابت گازها و T دمای مطلق است. معادله (۲) رابطه اصلی حاکم بر توضیح پدیده انتقال در ماده IPMC است. این رابطه علاوه بر زمان تحت تأثیر گرادیان‌های میدانی نظیر گرادیان پتانسیل الکتریکی $\nabla\phi$، گرادیان غلظت ∇C و گرادیان فشار حلال ΔP نیز است. این گرادیان‌ها در هر دو نوع انتقال وجود دارند. گرادیان پتانسیل ϕ با معادله پوآسون (رابطه (۳)) توضیح داده می‌شود. در روابط (۴) و (۵) ρ چگالی شارژ، C_0 غلظت آنیون و متغیر ε ثابت گذردهی مطلق مؤثر است که می‌توان آن را به صورت $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ نوشت که در آن ε_0

ضریب گذردهی خلأ و برابر مقدار (F/m)۱۰۱۲×۸/۸۵ است. که در آن C_0 غلظت اولیه کاتیون یا آنیون است [1,2]:

$$-\nabla^2\phi = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (۴)$$

$$\rho = F(C - C_0) \quad (۵)$$

غلظت کاتیون از رابطه (۶) به دست می‌آ ید، در حالی که غلظت آنیون وابسته به کشش حجمی محلی است [1,2].

$$dV = \nabla . u \quad (۶)$$

در رابطه (۶) u بردار جابه‌جایی محلی است. مقدار مثبت کشش حجم محلی نشانگر افزایش حجم محلی و منفی بودن آن به معنای کاهش حجم است. تغییرات حجم در ماتریس پلیمر غلظت آنیون‌ها را به عنوان بخش بدون تحرک پلیمر تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو متغیر غلظت آنیون C_a با رابطه (۷) تعریف می‌شود و C_0 غلظت اولیه کاتیون/آنیون است [1,2].

$$C_a = C_0(1 - dV) \quad (۷)$$

برای یک IPMC با ضخامت ۰/۴۵ میلی‌متر، با ضریب گذردهی مؤثر دی الکتریک ۰/۲mF/mو غلظت اولیه کاتیون ۱۲۰۰ mol/m3 است. افت پتانسیل ۱ ولت در این ناحیه باریک منجر به ایجاد گرادیان تقریبا برابر با ۱۰۶ ولت بر متر می‌شود. با در نظر گرفتن کشش IPMC خم شده در حدود ۱٪، با مدول یانگ ۲۰۰ مگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۴۹، فشار را می‌توان ۳/۵ مگاپاسکال برآورد کرد. این تخمین گرادیان فشار به صورت قراردادی در محدوده ۱۰۶ × ۳/۵ مطرح می‌شود. اگر عبارات $F\nabla\phi$ و $\Delta V\nabla P$ در رابطه (۱) مقایسه شوند، با توجه به اینکه ثابت فارادی و ΔV به ترتیب برابر مقادیر (C/mol)۹۶۴۸۵ و (m3/mol)۱۰−۶×۶ است، می‌توان مشاهده کرد که گرادیان ولتاژ به‌صورت رابطه (۸) است [1,2]:

$$|F\nabla\phi| \gg |\Delta V\nabla P| \quad (۸)$$

بنابراین، بخش سوم شار شکل مکانیکی $\mu C\Delta V\nabla P$ در محاسبات انتقال الکترومکانیکی در نظر گرفته نمی شود. علاوه بر این، همان طور که توضیح داده شد، چگالی بار با نیرو های بدنه در ماده مرتبط است، یعنی [1,2]:

$$F = f(\rho) = g(C) \quad (۹)$$

بنابراین فرآیند کوپلینگ، فعل و انفعال بین بخش بدون تحرک و حلال را توصیف می‌کند و عبارت گرادیان فشار قابل چشم‌پوشی است. پس معادله نرنست‌پلانک در مورد عملگر الکترومکانیکی به صورت زیر استفاده می‌شود [1,2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla.(D\nabla C - z\mu FC\nabla\phi) = 0 \quad (۱۰)$$

لازم به ذکر است که برای اکثر محاسبات عملی تقریب $C_a = C_0$ کاملا منطقی است. فقط در موارد انتقال مکانوالکتریکی، که ترم‌های مربوط به شار بسیار کوچک هستند، باید از رابطه (۷) استفاده شود. این ساده‌سازی‌ها مفاهیم معناداری دارند، یعنی محاسبه سیستم PNP (پوآسون نرنست پلانک) از مدل الاستیک خطی جدا می‌شود.

پیاده سازی مدل IPMC در سه‌بعد

مدل انتقال الکترومکانیکی با روش FEM (Finit Element Methode) حل شده است. به‌منظور محاسبه فیزیک‌های مدل، سیستم معادلات پوآسون، نرنست‌پلانک و فرم دیفرانسیلی قانون اهم به‌طور هم‌زمان حل شده است. برای انجام این کار، شرایط مرزی مناسب تعریف شده و مدل با نرم‌افزار المان محدود کامسول پیاده‌سازی می‌گردد. معادلات PNP در ناحیه پلیمری حل شده و چگالی جریان الکتریکی در نواحی الکترودی پیاده‌سازی شده‌اند. حل این معادلات با انتخاب فیزیک‌های مربوطه انجام خواهد گرفت [1,2].

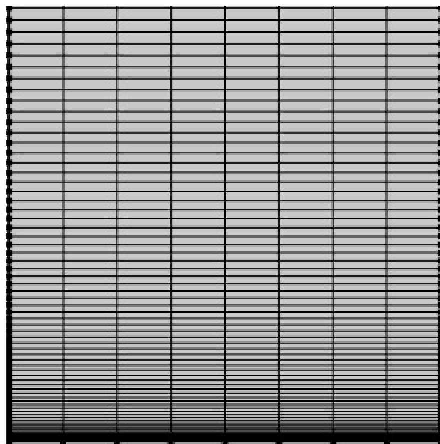
از آنجا که در نسخه‌های جدید نرم‌افزار کامسول امکان شکل‌دهی حجمی (Extrude) مدل دوبعدی به فضای سه‌بعدی در اختیار کاربر قرار گرفته است. پس از بررسی حالت دوبعدی، برای شبیه‌سازی نوار IPMC در فضای سه‌بعدی دو روش پیش‌روست:

۱. از ابتدا در فضای سه‌بعدی، تعریف هندسه نوار IPMC و سپس تحلیل معادلات مربوطه انجام شود.
۲. پس از آنکه مدل دوبعدی به نتیجه رسید، با گسترش دادن یا به نوعی حجم بخشیدن به هندسه دوبعدی تعریف شده، مدل به فضای سه‌بعدی انتقال یابد و تحلیل شود.

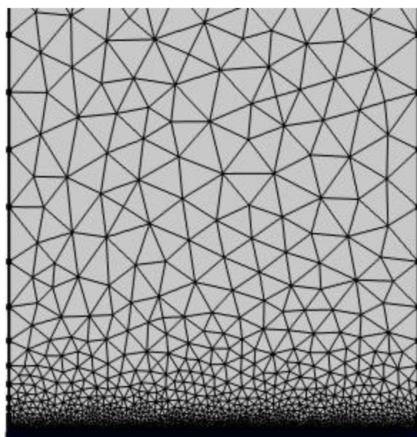
از این دو روش، روش اول به دلیل امکان مشاهده سطوح الکترودها و آماده‌سازی هندسه برای محاسبات المان محدود به منظور انجام شبیه‌سازی انتخاب می‌شود.

مدل برای تیر یک سر درگیر تهیه و بررسی شده است. هندسه مدل ایجاد شده در ابعاد ۲۸/۵mm، ۰/۴۵mm و ۵mm طراحی و پیاده‌سازی گردیده است. مقادیر ابعاد تیر با هدف اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی با داده‌های آزمایش عملی، مشابه نمونه نقوی و همکارانش در [1] در نظر گرفته شده است. در این هندسه ۲/۵ mm از طول تیر جهت اعمال ولتاژ در یک گیره ثابت در نظر گرفته شده است. در نواحی الکترودی از فیزیک Electric Currents برای اعمال ولتاژ تحریک خارجی و اثر الکتریکی الکترودها و در نواحی (بخش داخل گیره و بخش آزاد) پلیمری از فیزیک Transport of Diluted Species برای پیاده‌سازی معادلات فیزیکی–شیمیایی استفاده شده است [27]. هم‌چنین فیزیک Sold Mechanics جهت محاسبه جابه‌جایی ناشی از اعمال نیروهای الکترواستاتیکی و فیزیک General Form of PDE برای حل معادلات دیفرانسیل مورد استفاده در مدل به کار گرفته شده است [13]. برای حل معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی در نرم‌افزار مش‌بندی یا ایجاد یک طرح شبکه‌ای در هندسه ماده ضروری است. در دستیابی به نتایج منطقی و صحیح انتخاب مش و نیز عدم وابستگی نتایج به تعداد المان‌ها و نوع مش بندی (اصطلاحا رسیدن به مدل مستقل از مش) بسیار حائز اهمیت است [1]. انتخاب مش به میزان زیادی وابسته به آن است که کوپل (جفت شدن) جریان الکتریکی/شاریونی بر اساس قضیه راموشاکلی است یا قانون گاوس [13]. برای مورد اول به انتگرال‌گیری روی کل ناحیه نیاز است که در نرم‌افزار چند فیزیکی کامسول می‌توان آن را فقط در مش‌های مثلثی محاسبه کرد. در مورد کوپل مبتنی بر قانون گاوس، مش‌های نگاشت (Mapping)، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت مش نگاشت در مقایسه با مش مثلثی، کنترل بیشتر بر اندازه و توزیع عناصر است. صرف نظر از انتخاب، مش در نزدیکی مرزهای الکترود و نفیون به علت تغییر زیاد غلظت ∇C و گرادیان پتانسیل ∇□ باید مش‌بندی مناسب باشد. نمونه مش‌های مثلثی و نگاشت در شکل (۳) نمایش داده شده است [13,27]. مش-های نگاشت به صورت مکعب و مش‌های دو بعدی مثلثی در حالت سه‌بعدی به صورت هرم چهاروجهی (Tethrahedral) می‌شود.

به‌منظور انجام حل معادلات روی فیزیک‌های مدل از دو مطالعه وابسته به زمان به‌گونه‌ای که بخش اول تحلیل اثر الکتریکی الکترودها، فرایندهای الکتروشیمیایی و بخش دوم به‌منظور تحلیل معادلات ارتعاش مکانیکی، اعمال نیروی الکترواستاتیک و پیش‌بینی جابه‌جایی را انجام دهد از دو مطالعه وابسته به زمان استفاده شده است. در این مقاله مطابق با [2] ثابت انتشار D، ۱۰−۱۱× ۰/۷، ضریب گذردهی الکتریکی ε، ۱۰۳× ۰/۲، مدول یانگ E، ۴۱MPa و ضریب پوآسون ۰/۴۹ در نظر گرفته شده است. تمامی پارامترها و مشخصات ماده IPMC به استناد [1] مقداردهی شده‌اند.



(الف)



(ب)

شکل ۳ نمونه‌هایی از مش‌بندی در نرم‌افزار کامسول برگرفته از [13] الف) مش نگاشت و ب) مش مثلثی

نتایج

با توجه به آنکه کوچک کردن ابعاد و افزایش تعداد المان‌های مش‌بندی بسته به مشخصات پردازنده و حافظه رایانه امکان‌پذیر است، ملاک قابل پذیرش بودن مش‌بندی با توجه به میزان پارامترهای آماری نظیر Average element quality قابل ارزیابی است. این پارامتر ویژگی بهینه بودن مش را با نمایش مقداری بین ۰ و ۱ تبیین می‌کند. این مقدار هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، به مش ایدئال نزدیک‌تر است. مش‌بندی بهینه با استفاده از کمترین تعداد المان، تنظیم نرخ رشد مناسب بین المان‌های مجاور، تأمین حد قابل قبولی از فاکتورهای آماری تنظیم مش در نرم‌افزار و... محقق می‌شود. (شکل ۴). لازم به ذکر است که کاهش ابعاد مش لزوما نشان‌دهنده کیفیت مطلوب مش‌بندی و افزایش دقت محاسبات نیست. بلکه ملاک تشکیل مشی است که بتوان به نحو مطلوب مدل را به مقدار بهینه نزدیک و نزدیک‌تر کرد و از واگرایی تخمین در روش های گسسته‌سازی ریاضی جلوگیری نمود.

Statistics
Complete mesh
Mesh vertices: 3264
Element type: All elements
Hexahedra: 2250
Quads: 3435
Edge elements: 598
Vertex elements: 24
Domain element statistics
Number of elements: 2250
Minimum element quality: 1.0
Average element quality: 1.0
Element volume ratio: 0.00709
Mesh volume: 64.13 mm^3

شکل ۴ ارزیابی مش‌بندی

تیر یک سر درگیر شبیه‌سازی شده در این پژوهش، ت حت اعمال ولتاژ مستقیم با دامنه ۳/۵ ولت و به مدت زمان ۱۴۰ ثانیه تحریک شده است.

در شکل (۵) به وضوح تغییرات مؤلفه‌های نیروی وارد بر مرز میان پلیمر و الکترود مشاهده می‌گردد. در مدل دو دسته نیروی مرزی دیده می‌شود. پیکان‌ها نشانگر نیروهای مرزی ناشی از اعمال نیرو الکترواستاتیک در مرز الکترود بالایی و پلیمر است و مخروط‌ها نمایانگر نیروهای مرزی ناشی از میدان الکترواستاتیک به حدفاصل الکترود پایینی و پلیمر است.

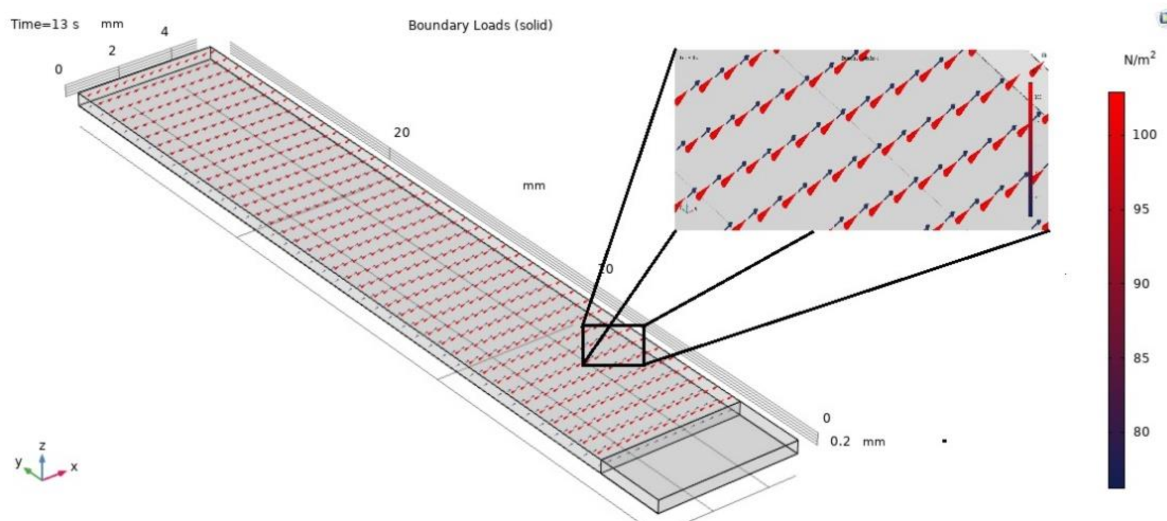
با توجه به طیف رنگ گرادیانی در شکل (۶) می‌توان دریافت که بیشترین تنش وارد به تیر IPMC در نواحی قرمزرنگ نزدیک به گیره و کمترین تنش به نواحی آبی رنگ (نوک تیر) اعمال می‌گردد. از ناحیه مهارشده در گیره به دلیل ثابت بودن صرف نظر شده است.

شکل (۷) نتیجه تغییرات غلظت نفیون پس از تحریک IPMC را نشان می‌دهد. همان طور که در بزرگ‌نمایی این شکل دیده می‌شود در نمودار تغییرات غلظت نواحی الکترودی بی-رنگ هستند. با توجه به این تغییرات غلظت، تورم IPMC در ناحیه قرمزرنگ این شکل رخ می‌دهد. لازم به‌ذکر است گرادیان غلظتی دقیقا معکوس گرادیان پتانسیل در نواحی پلیمری است.

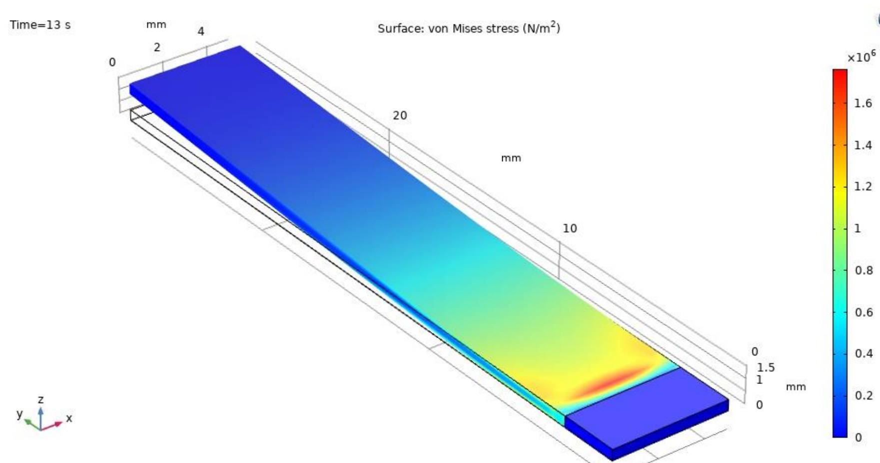
مهم‌ترین نتیجه این مدل‌سازی، تحلیل جابه‌جایی نوک تیر IPMC است. در شکل (۸) داده‌های حاصل از اعمال فیزیک-های مختلف روی جابه‌جایی تیر IPMC مدل‌سازی شده و نمونه واقعی [21] با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. انطباق داده‌های حاصل از مدل‌سازی با نمونه مشابه واقعی تحت ولتاژ مستقیم ۳/۵ ولت نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن مدل طراحی شده است. بر مبنای معیار ذکر شده در رابطه (۱۱) بین داده‌های مدل‌سازی IPMC و نمونه واقعی انطباق ۹۳ درصدی وجود دارد [1].

$$\text{Fitting}(\%) = 100 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\hat{d}_i - d_i}{d_i} \right|}{n} \qquad (11)$$

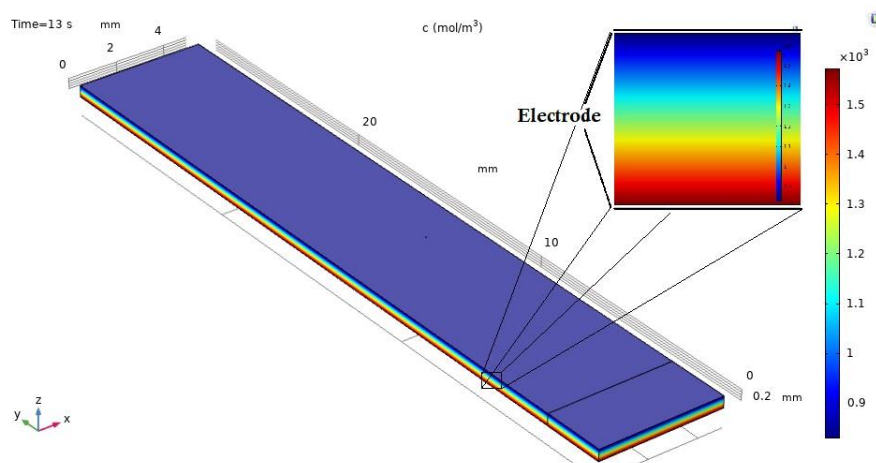
در این رابطه $\hat{d}$ معرف جابه‌جایی حاصل از مدل‌سازی، d جابه‌جایی نمونه واقعی، i گام‌زمانی و n تعداد کل گام‌های زمانی ثبت شده است.



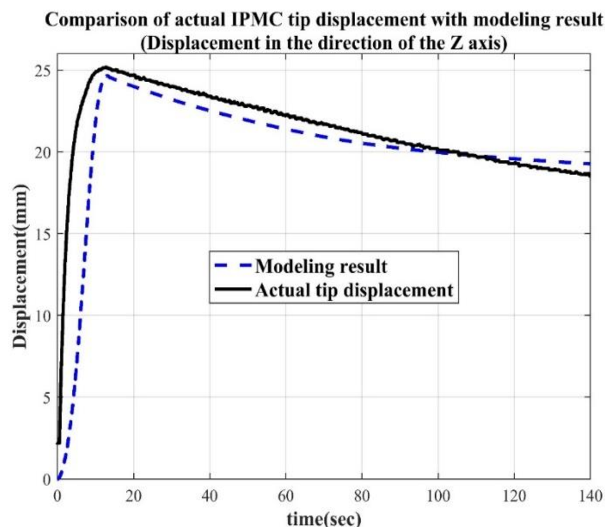
شکل ۵ نیروهای بدنه تیرIPMC . نیروهای وارد بر مرز الکترود بالا (پیکان) و پایین (مخروط) با پلیمر (تحت اعمال ولتاژ DC با دامنه ۳/۵ ولت در مدت زمان ۱۴۰ ثانیه)



شکل ۶ توزیع تنش در IPMC . (تحت تحریک الکتریکی مستقیم با دامنه ۳/۵ ولت در مدت زمان ۱۴۰ ثانیه)



شکل ۷ گرادیان غلظت در نواحی پلیمری کامپوزیت IPMC (تحت تحریک الکتریکی مستقیم با دامنه ۳/۵ ولت در مدت زمان ۱۴۰ ثانیه)



شکل ۸ مقایسه جابه‌جایی نوک IPMC در حالت پس‌آرامش (تحت اعمال ولتاژ DC با دامنه ۳/۵ ولت در مدت زمان ۱۴۰ ثانیه)
با نمونه مشابه مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار چند فیزیکی کامسول

نتیجه‌گیری

پدیده بازگشت به حالت استراحت (Back Relaxation) مشاهده شده در نوارهای با آرایش پایه IPMC که با اعمال ولتاژ DC تحریک شده‌اند، به دلیل وجود مولکول‌های غیرهیدارته در شبکه پلیمری است. بنابراین، از آنجا که کاتیون‌های هیدراته از سمت الکترود آند به سمت الکترود کاتد در حرکت‌اند، به‌طور هم‌زمان برخی مولکول‌های آزاد آب را، به‌عنوان جرم اضافی، به سمت کاتد منتقل می‌کنند، و اگر ولتاژ تحریک DC باشد، به علت تعادل استاتیک انتظار می‌رود IPMC در نقطه انتهایی فعالیت خودش بماند و به عقب (یعنی حالت قبل از تحریک و خمش) برنگردد، اما در واقع نوار IPMC به عقب خمیده می‌شود و در نتیجه پدیده Back Relaxation را از خود نشان می‌دهد. هدف این مدل‌سازی پیش‌بینی میزان بازگشت IPMC به حالت پس‌آرامش بود. با توجه به نتایج گزارش شده در بخش چهارم و انطباق قابل قبول مدل با واقعیت، می‌توان مدل IPMC سه‌بعدی را به هندسه‌های دیگر با ابعاد الکترود و ضخامت پلیمر گوناگون نیز تعمیم داد. مدل توصیف‌شده قادر است علاوه بر جابه‌جایی مؤلفه‌های دیگری نظیر تغییرات غلظت، تغییرات پتانسیل، تغییرات نیروهای مرزی، و میزان تنش وارد بر هر نقطه از هندسه، انواع IPMC را با در دست داشتن خواص مکانیکی، شیمیایی و الکتریکی بخش پلیمری پیش‌بینی نماید. قطعا با توجه به هزینه‌های تهیه یک تیر IPMC استفاده از این مدل از لحاظ وقت و هزینه بسیار مقرون به صرفه خواهد بود و مانع از هدررفت نمونه‌های سالم و نیز تهیه سخت‌افزار دقیق ثبت داده از این ماده خواهد شد.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] M. Shahinpoor, Fundamentals of ionic polymer metal composites (IPMCs). 2015.

[2] D. Pugal, “Physics based model of ionic polymer-metal composite electromechanical and mechanoelectrical transduction”. University of Nevada, Reno. 2012.

[3] W. G. Grot, Nafion® membrane and its applications. In Electrochemistry in Industry. Springer, Boston, MA. pp. 73-87 1982.

[4] A. Kusoglu, A. Z. Weber, “ New insights into perfluorinated sulfonic-acid ionomers. Chemical reviews,” vol. 117, no.3, pp. 987-1104. 2017.

[5] S. Church, Del. firm installs fuel cell. The News Journal, 6, B7. 2006.

[6] C. Heitner-Wirguin, “Recent advances in perfluorinated ionomer membranes: structure,” properties and applications. *Journal of membrane Science*, vol. 120, no.1, pp.1-33. 1996.

[7] N. D. N. Chi, T. D. Quang, J. I. Yoon, and K. K. Ahn, “Identification of ionic polymer metal composite actuator employing fuzzy NARX model and Particle Swam Optimization,” *in Proc. IEEE Int. Conf. Control, Autom. Syst.*

(ICCAS), pp. 1857–1861, Oct. 2011.

[8] M. Annabestani and N. Naghavi, “Nonlinear identification of IPMC actuators based on ANFIS–NARX paradigm,” *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 209, pp. 140–148, Mar. 2014.

[9] M. Shahinpoor, “Ionic polymer–conductor composites as biomimetic sensors, robotic actuators and artificial muscles—A review,” *Electrochim. Acta*, vol. 48, no. 14–16, pp. 2343–2353, 2003.

[10]M. Annabestani and N. Naghavi, “Non-uniform deformation and curvature identification of ionic polymer metal composite actuators,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct*., vol. 26, no. 5, pp. 582–598, 2014.

[11]J. Brufau-Penella, J. Sá¡nchez-Martín, and M. Puig-Vidal, “Piezoelectric polymer model validation applied to mm size micro-robot I-SWARM (intelligent swarm),” *Proc. SPIE*, vol. 6166, p. 61660Q, Mar. 2006.

[12]R. Dong and Y. Tan, “A model based predictive compensation for ionic polymer metal composite sensors for displacement measurement,” *Sens. Actuators A, Phys*., vol. 224, pp. 43–49, Apr. 2015.

[13]A. G. Zuquello, M. C.Saccardo, R.Gonçalves, K. A.Tozzi, R. Barbosa, L. A.Hirano, & C. H. Scuracchio, PI controller for IPMC actuators based on Nafion®/PT using machine vision for feedback response at different relative humidities. Materials Research, 25. (2022).

[14]M. Annabestani, M. H. Sayad, P. Esmaeili-Dokht & M. Fardmanesh, “ Toward a High-Performance Ionic Soft Actuator: A Disturbance-Aided Method for Elimination of Back Relaxation of Pattern-Free Ipmc Actuators,”

[15]A. G. Zuquello, M. C. Saccardo, R. Gonçalves, K. A.Tozzi, R. Barbosa, L. A.Hirano, & C.H. Scuracchio, “ PI controller for IPMC actuators based on Nafion®/PT using machine vision for feedback response at different relative humidities,” Materials Research.25. (2022).

[16]A. M. Arnold, J. Su, & E. M. Sabolsky, “ Influence of environmental conditions and voltage application on the electromechanical performance of Nafion-Pt IPMC actuators,” *Smart Materials and Structures.* vol. 31, no.11, 115031. 2022,

[17]M. Zhang, M. Wang, X. Zhang, C. Zhang, Li, M., & Yu, S. “ Fabrication of a multilayered SGO/macroporous Nafion-based IPMC with enhanced actuation performance,”Sensors and Actuators B: Chemical.356, 131319. (2022).

[18]G. Yin, M. Yu, X. Tong, Y. Wu, C. Tian & Y. Li, (2022), “ Fabrication and performance analysis of high-performance cylindrical ionic polymer-metal composite actuators with various diameters,” Smart Materials and Structures, 31(11), 115003.

[19]W. MohdIsa, A. Hunt and S. H. HosseinNia , ”Sensing and Self-Sensing Actuation Methods for Ionic Polymer–Metal Composite (IPMC): A Review”. *Sensors*, vol. 19, no. 18, 3967, 2019.

[20]H. Zamyad, and N. Naghavi, “Behavior identification of IPMC actuators using Laguerre-MLP network with consideration of ambient temperature and humidity effects on their performance”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 11, 2723-2732, 2018.

[21]H. Zamyad, N. Naghavi, R. Godaz, & R. Monsefi, “ A recurrent neural network–based model for predicting bending behavior of ionic polymer–metal composite actuators,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 31, no. 17, pp. 1973-1985, 2020.

[22]H. Zamyad, N.Naghavi, & H. Barmaki, “ A combined fuzzy logic and artificial neural network approach for non-linear identification of IPMC actuators with hysteresis modification,” *Expert Systems*, vol. 35, no.4, e12283, 2018.

[23]P. AziziHariri, A. H.Ebrahimi, Zamyad & S. Sahebian, “ Bending Movement Analysis of Soft Actuators Fabricated with Silicone-Ethanol,” Carbon Fabric Composites.

[24]K. Sadeghipour, R. Salomon, & S. Neogi, “ Development of a novel electrochemically active membrane and'smart'material based vibration sensor/damper,” *Smart Materials and Structures*, vol. 1, no. 2, pp.172. 1992.

[25]K. Asaka & K. Oguro, “Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli: Part II. Response kinetics”. Journal of Electroanalytical Chemistry, vol. 480, vol. 1-2, pp.186-198, 2000.

[26]M. Porfiri, “Charge dynamics in ionic polymer metal composites,” *Journal of Applied Physics*, vol. 104, no.10, 104915, 2008.

[27]Z. Chen, &X. Tan, “A Control-Oriented and Physics-Based Model for Ionic Polymer--Metal Composite Actuators”. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 13, no. 5, pp.519-529, 2008.

[28]B. J. Akle, W. Habchi, T. Wallmersperger, E. J. Akle, & D. J. Leo, “High surface area electrodes in ionic polymer transducers: numerical and experimental investigations of the electro-chemical behavior,” Journal of Applied Physics, vol. 109, no. 7, pp. 074509, 2011.

[29]H. Zamyad, N. Naghavi, and H. Barmaki, “A combined fuzzy logic and artificial neural network approach for nonlinear identification of IPMC actuators with hysteresis modification,” *Expert System*, vol. 35, no, 4, pp.e12283., 2018.

[30]Y. Bar-Cohen, “Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential, and challenges (Vol. 136, pp. 1-765)”. Bellingham, WA: SPIE press, 2004.

[31]R. Dong, and Y. Tan, “A model based predictive compensation for ionic polymer metal composite sensors for displacement measurement,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 224, pp.43-49, 2015.

[32]M. Shahinpoor and K. J. Kim, “Ionic polymer–metal composites: IV. Industrial and medical applications”. *Smart materials and structures*, vol. 14, no, 1, pp.197, 2004.

[33]R. Dong & Y. Tan “A model based predictive compensation for ionic polymer metal composite sensors for displacement measurement”. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 224, pp. 43-49, 2015.

[34]D. Pugal , K. Jung ,A. Aabloo, K.J. Kim , “ Ionic polymer-metal composite mechanoelectrical transduction: review and perspectives,” *Polym Int*, vol. 59, no.3. pp.:279–289. 2010.

[35]C. Jo, D. Pugal, Oh I-K, K.J. Kim , K. Asaka “ Recent advances in ionic polymer-metal composite actuators and their modeling and applications,” *Prog Polym Sci*, vol. 38, no. 7, pp.1037–1066. 2013.

[36]A. Punning ,K.J Kim , V. Palmre , F. Vidal ,C. Plesse , N. Festin ,A. Maziz , K. Asaka , T. Sugino , G. Alici et al “ Ionic electroactive polymer artificial muscles in space applications,” Sci Rep 4:6913(2014).

[37]M. Annabestani, M. Maymandi-Nejad, and N. Naghavi. "Restraining IPMC back relaxation in large bending displacements: applying non-feedback local Gaussian disturbance by patterned electrodes." *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 4, pp.1689-1695, 2016.

[۳۸] م. محمودنژاد، ۱۳۹۸، هفته چهارم دوره جامع آموزش عمومی کامسول- مش بندی در کامسول.

[39]H. Zamyad, & N. Naghavi " Behavior identification of IPMC actuators using Laguerre-MLP network with consideration of ambient temperature and humidity effects on their performance," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* vol. 67, no. 11, pp. 2723-2732, 2018.